

УДК 536.21

## ОЦЕНКА КОНВЕКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ ШИХТЫ В ПЕЧИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОСТЕКЛА

Р.В. Городов, А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет

E-mail: gorodov@tpu.ru

Дается сравнение решений задачи нагрева шихты в печи по производству пеностекла с учетом конвективной и радиационной составляющих подвода тепла (предлагаемая модель) и только конвективного подвода тепла (существующая модель). Проведен анализ влияния величины степени черноты стекольной шихты на интенсивность процесс нагрева. Сделан вывод о необходимости учета радиационной составляющей подвода тепла при расчете температурных режимов процесса производства пеностекла.

### Ключевые слова:

Модели нагрева стекольной шихты, радиационный и конвективный теплообмен, влияние степени черноты стекла.

### Введение

Согласно [1] факторы, от которых зависят конечные свойства пеностекла, обобщенно можно представить четырьмя основными группами:

- 1) определяемые составом и свойствами исходных компонентов;
- 2) относящиеся к условиям синтеза пенообразующих систем;
- 3) определяемые явлениями теплообмена в среде переменного состава и течения силикатного расплава;
- 4) зависящие от условий стабилизации ячеистой структуры и отжига пеностекла.

Наиболее изучены факторы 1-й и 4-й групп, которые затрагиваются в большинстве работ по технологии пеностекла [1–6]. Работы, посвященные синтезу пенообразующих смесей, явлениям теплообмена и течения силикатного расплава, в литературе практически отсутствуют [1].

Оптимальный температурный режим является одним из важнейших этапов в рациональной технологии производства пеностекла, так как в зависимости от выбранного режима можно получить пеностекло с широким диапазоном свойств. Для научно-обоснованного объяснения свойств и структуры пеностекла на различных этапах его возникновения необходимо достаточно полно знать механизм формирования исходной системы, из которой в результате постепенного накопления газообразных продуктов при нагревании формируется пеностекло. При разработке теоретической кривой вспенивания необходимо учитывать взаимосвязь между физическим состоянием смеси на каждом технологическом этапе и динамикой изменения ее теплофизических свойств [2].

Подогрев пенообразующей смеси в металлической форме до температуры спекания продолжается относительно длительное время. Но данные о времени нагрева шихты до температур спекания являются неоднозначными. В [2] проведен анализ пяти экспериментов, проведенных различными исследователями, и показано, что это время лежит в

довольно широких пределах: от 15 до 70 мин., хотя условия экспериментов практически одинаковые.

Приведенные примеры достаточно наглядно иллюстрируют отсутствие единого мнения об оптимальном режиме нагрева пенообразующей смеси, предшествующего вспениванию. Исходя из этого, считаем целесообразным более детально изучить тепловые процессы на первой стадии формирования пеностекла – нагреве шихты.

### Существующая математическая модель нагрева стекольной шихты

Математическая модель процесса нагрева шихты впервые была заявлена И.И. Китайгородским, приведена в [3] и представляет собой одномерную симметричную задачу теплопроводности с граничными условиями третьего рода (рис. 1, а):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 < x < L; \quad (1)$$

$$\tau = 0: \quad T = T_0, \quad 0 < x < L; \quad (2)$$

$$x = 0: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{\partial x} - T), \quad \tau > 0; \quad (3)$$

$$x = L: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_{\partial x} - T), \quad \tau > 0, \quad (4)$$

где  $T_{\partial x}$ ,  $T$  – температуры омывающего газа и шихты соответственно;  $T_0$  – начальная температура шихты;  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – плотность, теплоемкость и теплопроводность шихты;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $L$  – толщина нагреваемого слоя,  $\tau$  – время.

Таким образом, в данной модели учитывается только конвективная составляющая подвода тепла от газа печного пространства к поверхности шихты  $q_{\text{конв}}$ . Аналитические решения этой задачи для температуры поверхности  $T_{\text{нов}}$  и центра засыпки  $T_{\text{ц}}$  известны [7, 8] и могут быть представлены в следующем виде:

$$T_{\text{нов}}(\tau) = T_{\partial x} + (T_0 - T_{\partial x}) \cdot f_3,$$

$$T_{\text{ц}}(\tau) = T_{\partial x} + (T_0 - T_{\partial x}) \cdot f_4,$$

где

$$f_3 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n) \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo),$$

$$f_4 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo),$$

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}.$$

В этих выражениях  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $\text{ctg}(\mu) = (1/\text{Bi}) \cdot \mu$ ;  $Fo = \alpha \tau / L^2$  – число Фурье,  $\text{Bi} = (\alpha L) / \lambda$  – критерий Био.

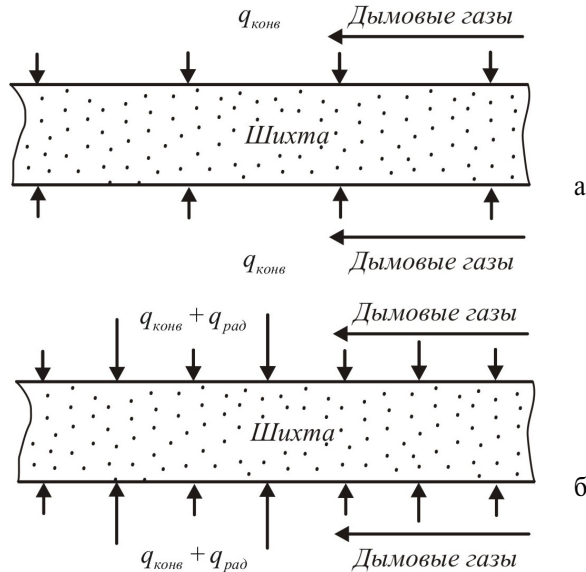


Рис. 1. Схема подвода тепла к шихте за счет: а) конвекции; б) конвекции и радиации

#### Математическая модель нагрева стекольной шихты с учетом радиационной составляющей подвода тепла

##### Постановка задачи

Математическая модель (1)–(4) не претерпела изменений до настоящего времени. Однако согласно [9] в печах или в зонах высоких температур туннельных печей основным видом теплоотдачи газов к материалу является излучение. Конвективный теплообмен преобладает над радиационным при пониженных температурах газов и при относительно высоких скоростях движения (3...5 м/с) [10]. Поэтому, для ответа на вопрос о необходимости учета радиационной составляющей подвода тепла при нагреве шихты в печи, проведем решение задачи с учетом (рис. 1, б) и без учета излучения в диапазоне температур греющего газа 400...1000 °С, что соответствует условиям производства пеностекла на заводе ОАО ТДСК (г. Томск). С учетом излучения граничные условия для уравнения (1) с начальным условием (2) примут следующий вид:

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{\text{де}} - T) + \varepsilon_{\text{эфф}} \sigma (T_{\text{де}}^4 - T^4), \quad \tau > 0; \quad (5)$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{\text{де}} - T) + \varepsilon_{\text{эфф}} \sigma (T_{\text{де}}^4 - T^4), \quad \tau > 0, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{эфф}}$  – приведенная степень черноты,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

##### Подготовка исходных данных

Расчет процесса горения рабочего газа в печи проведен по методике, предложенной П.Л. Левченко [9], поэтому приведем лишь основные результаты.

Состав рабочего газа по данным ОАО ТДСК представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав рабочего газа по данным ОАО ТДСК, %

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
93,000	1,198	0,700	0,400	0,198	0,198	3,306	1,000

В результате расчета процесса горения были определены объемы продуктов сгорания газообразного топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :  $V_{\text{CO}_2} = 1,003$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,147$ ,  $V_{\text{N}_2} = 8,962$ ,  $V_{\text{O}_2} = 0,396$ . Общее количество продуктов сгорания составляет  $V_{\text{а}} = 12,508$ . Теоретическая температура горения газа определялась по  $i$ - $t$  диаграмме и была равна 1800 °С. Действительная температура горения, вычисленная с учетом потерь в окружающую среду, составила 1496 °С. Дымовые газы, поступающие в зону нагрева печи, по требованиям технологии производства должны иметь температуру 820 °С. Поэтому дымовые газы, образующиеся в камерах сгорания и имеющие температуру 1496 °С, разбавляют воздухом до температур исследуемого диапазона. Из уравнений теплового баланса определялось количество воздуха, идущего на разбавление дымовых газов в камерах сгорания зоны нагрева до 820 °С  $V_{\text{возд}}^{\text{разб}} = 15,057^3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  и общий расход дымовых газов  $V_{\text{де}}^{820} = 27,565 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Определение приведенной степени черноты проводилось в соответствии с методикой, изложенной в [10]. Учитывалось только излучение трехатомных газов в продуктах сгорания (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), так как двухатомные газы практически не излучают и прозрачны для теплового излучения. Степени черноты CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O находили в зависимости от температуры и парциального давления по номограммам [9]. Степень черноты излучающего газа  $\varepsilon_{\text{де}}$  определялась по формуле:

$$\varepsilon_{\text{де}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + B \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

где  $B = 1,03$  – поправочный коэффициент на парциальное давление водяного пара. Степень черноты CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и дымовых газов в зависимости от температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2. Степени черноты CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в зависимости от температуры дымовых газов печного пространства  $T_{\text{др}}$  [10]

Степень черноты	Температура дымовых газов $T_{\text{др}}$ , °С			
	400	600	800	1000
$\varepsilon_{\text{CO}_2}$	0,074	0,080	0,078	0,068
$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$	0,136	0,120	0,097	0,083
$\varepsilon_{\text{др}}$	0,214	0,204	0,178	0,153

Приведенную степень черноты находили по выражению [10]:

$$\varepsilon_{эфф} \approx \frac{\varepsilon_{ст} + 1}{2} \cdot \varepsilon_{де} = \frac{0,94 + 1}{2} \cdot \varepsilon_{де} = 0,97\varepsilon_{де},$$

где  $\varepsilon_{ст}$  – степень черноты шихты для производства пеностекла. К сожалению, данных по степени черноты стекольной шихты в литературе не обнаружено. Степень черноты стекла, используемого при производстве шихты,  $\varepsilon_{ст}=0,94$  [11]. Согласно [10], при увеличении шероховатости поверхности тела, воспринимающего излучение, степень черноты увеличивается. Тем не менее, было проведено исследование влияния величины степени черноты исходного стекла на процесс нагрева шихты, для чего задавались несколькими значениями  $\varepsilon_{ст}$  в интервале 0,40...0,98. Результаты расчета приведенной степени черноты системы в зависимости от степени черноты исходного стекла и температуры греющего газа в печи сведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Приведенная степень черноты  $\varepsilon_{эфф}$  в зависимости от температуры дымовых газов печного пространства  $T_{др}$

Степень черноты исходного стекла, $\varepsilon_{ст}$	Температура дымовых газов $T_{др}$ , °С			
	400	600	800	1000
0,40	0,150	0,143	0,125	0,107
0,80	0,193	0,184	0,160	0,138
0,90	0,203	0,194	0,169	0,145
0,94	0,208	0,198	0,173	0,148
0,98	0,212	0,202	0,176	0,151

Для вычисления коэффициента теплоотдачи от газов к поверхности шихты необходимо знать скорость движения дымовых газов. По данным ОАО ТДСК средний расход природного газа в печи по производству пеностекла составляет  $G_g=0,00965$  м³/с. По известному объему дымовых газов, образующихся на 1 м³ сгоревшего природного газа, определен расход дымовых газов в зоне нагрева печи в единицу времени  $G_{де}=0,266$  м³/с. Следовательно, средняя скорость дымовых газов, омывающего шихту составит:

$$\bar{v} = \frac{G_{де}}{S_{прох}} = \frac{0,266}{2,7} = 0,099 \text{ м/с},$$

где  $S_{прох}$  – площадь проходного сечения печи.

Для упрощения решения в данной модели были сделаны следующие допущения:

- физические свойства шихты не зависят от температуры и равны:  $\rho=700$  кг/м³,  $\lambda=0,233$  Вт/(м·°С) [2];
- при определении теплоемкости шихты наличием газообразователя (кокса) пренебрегаем из-за его малой доли (не более 3 %);
- начальная пористость засыпки принята равной  $p=60$  % [12].

При этих допущениях теплоемкость шихты  $C_{ш}$  равна:

$$C_{ш} = p \cdot C_{возд} + (1 - p) \cdot C_{стек} = 0,6 \cdot 1005 + 0,4 \cdot 778 = 914,2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°С)},$$

где  $C_{возд}=1005$  Дж/(кг·°С) и  $C_{стек}=778$  Дж/(кг·°С) [9].

Оценка конвективной и радиационной составляющих при нагреве шихты

Решение систем (1)–(4) и (1), (2), (5), (6) с учетом данных табл. 4 проведено численно.

Для оценки вклада радиационной составляющей в общем подводе тепла проведен анализ полученных решений с допущением, что степени черноты шихты и исходного стекла одинаковы ( $\varepsilon_{ст}=0,94$ ), так как, как уже говорилось выше, достоверных данных по этому значению нет. Для этого определено количество подведенного к шихте тепла, соответствующего некоторым моментам времени, по формулам:

$$Q_k(T_{де}, \tau) = C_{ш} \cdot [\bar{T}_k(T_{де}, \tau) - T_0], \text{ кДж/кг},$$

$$Q_{кр}(T_{де}, \tau) = C_{ш} \cdot [\bar{T}_{кр}(T_{де}, \tau) - T_0], \text{ кДж/кг},$$

где  $Q_k(T_{де}, \tau)$ ,  $Q_{кр}(T_{де}, \tau)$ ,  $\bar{T}_k(T_{де}, \tau)$ ,  $\bar{T}_{кр}(T_{де}, \tau)$  – количества подведенного тепла и средние температуры шихты в зависимости от температуры омывающего газа и времени:  $k$  – только конвективный;  $кр$  – конвективный и радиационный подвод тепла. Результаты расчета подведенного количества теплоты приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Подведенное к шихте количество теплоты в зависимости от времени  $\tau$  и температуры греющего газа  $T_{др}$

Время $\tau$ , с	Температура дымовых газов $T_{др}$ , °С							
	400		600		800		1000	
	$Q_k$	$Q_{кр}$	$Q_k$	$Q_{кр}$	$Q_k$	$Q_{кр}$	$Q_k$	$Q_{кр}$
100	5,71	20,83	9,86	50,59	14,59	93,96	19,80	149,10
600	30,78	107,63	51,81	239,04	74,37	398,63	98,82	560,24
1800	80,00	244,87	130,22	459,03	185,21	659,94	240,17	849,39
3600	137,76	322,98	219,01	522,65	305,06	709,91	390,86	894,21

В табл. 5 приведены абсолютное и относительное расхождение подведенного количества тепла к шихте с учетом и без учета радиационной составляющей, вычисленные по формулам:

$$\Delta Q(T_{де}, \tau) = Q_{кр}(T_{де}, \tau) - Q_k(T_{де}, \tau), \text{ кДж/кг},$$

$$\delta Q(T_{де}, \tau) = \frac{\Delta Q(T_{де}, \tau)}{Q_{кр}(T_{де}, \tau)} \cdot 100 \%,$$

**Таблица 5.** Разность подведенного количества тепла к шихте с учетом и без учета радиационной составляющей

Время $\tau$ , с	Температура дымовых газов $T_{др}$ , °С							
	400		600		800		1000	
	$\Delta Q$	$\delta Q, \%$	$\Delta Q$	$\delta Q, \%$	$\Delta Q$	$\delta Q, \%$	$\Delta Q$	$\delta Q, \%$
100	15,12	72,58	40,73	80,50	79,37	84,47	129,30	86,72
600	76,85	71,40	187,23	78,33	324,26	81,34	461,42	82,36
1800	164,87	67,33	328,81	71,63	474,73	71,94	609,22	71,72
3600	185,22	57,35	303,64	58,10	404,85	57,03	503,35	56,29

Из табл. 4, 5 видно, что радиационная составляющая подвода тепла к шихте вносит значительный вклад в общий процесс при всех рассмотренных температурах греющего газа и временах нагрева. Однако необходимо отметить, что при временах

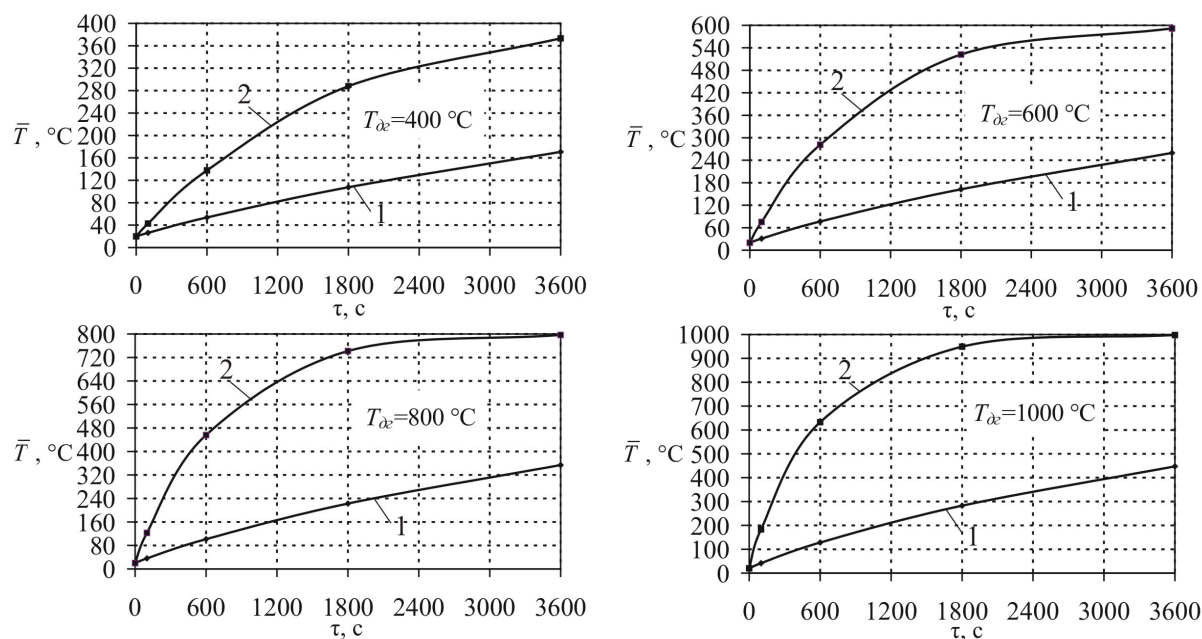


Рис. 2. Зависимость средней температуры шихты от времени при нагреве дымовыми газами с разной температурой: 1) без учета радиации, 2) с учетом радиации

меньших 1800 с вклад радиационной составляющей подвода тепла возрастает с увеличением температуры греющего газа, несмотря на то, что степень черноты газа при этом снижается (см. табл. 2). В то же время по мере приближения температуры поверхности шихты к температуре греющего газа относительный вклад радиационной составляющей подвода тепла незначительно снижается с ростом температуры греющего газа. Это обусловлено большей скоростью нагрева шихты в период времени до 1800 с за счет большей радиационной составляющей. Приведенные на рис. 2 графики зависимостей средних температур шихты от времени нагрева наглядно демонстрируют отмеченные закономерности.

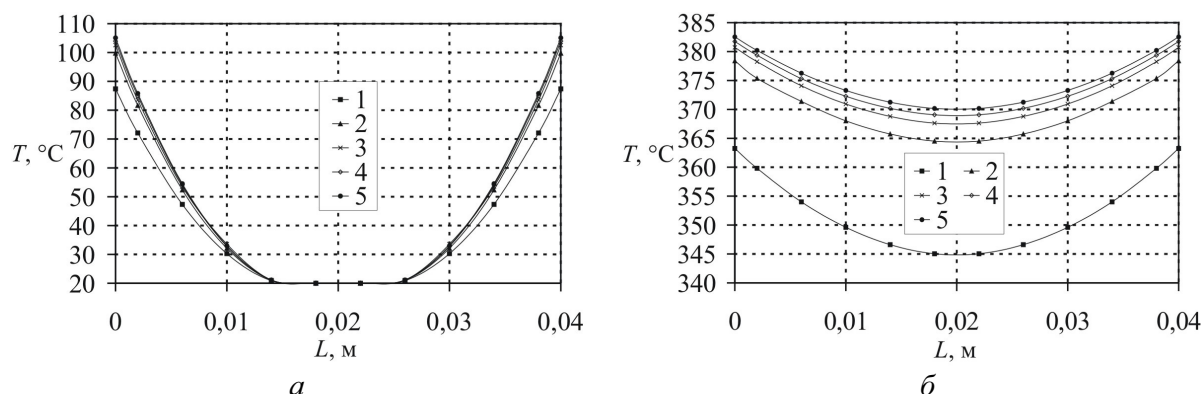
Оценка влияния степени черноты исходного стекла на процесс нагрева шихты

Из-за отсутствия данных по степени черноты стекольной шихты считаем целесообразным провести исследование влияния этой величины на процесс нагрева шихты в печи. Для этого проанализируем температурные поля в шихте в интервале значений степени черноты исходного стекла  $\varepsilon_{ст}=0,40...0,98$ .

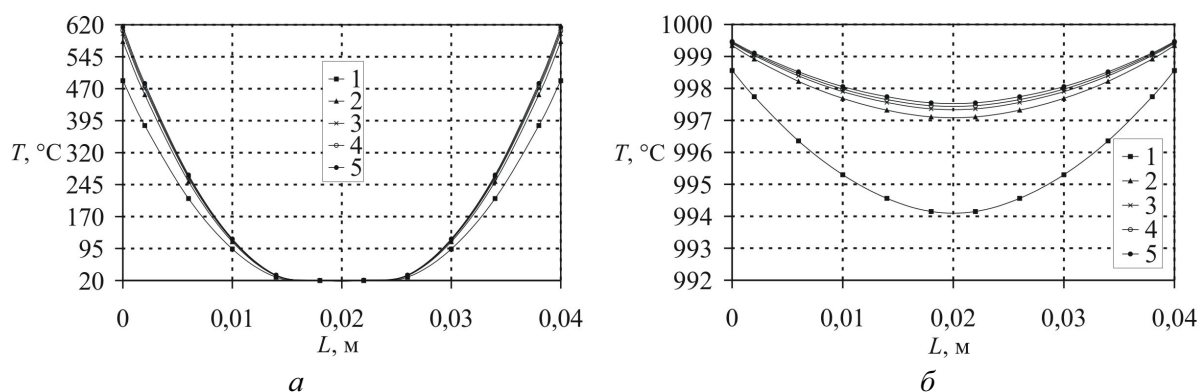
Критерием оценки влияния степени черноты на процесс нагрева будем считать максимальную разницу в значении температур шихты в какой-либо точке, определенной при  $\varepsilon_{ст}=0,98$  и  $\varepsilon_{ст}=0,40$ . На рис. 3, 4 представлены графики температурных полей в шихте для «крайних» значений исследуемого диапазона температур греющего газа (400 и 1000 °C) и времен нагрева (100 и 3600 с).

## Выводы

1. Величина степени черноты шихты оказывает наибольшее влияние на температурное поле на начальном этапе нагрева, так как максимальная разница между температурами поверхности шихты, определенными при  $\varepsilon_{ст}=0,98$  и  $\varepsilon_{ст}=0,40$ , составляет 33,60 и 125,36 °C через 100 с после начала нагрева при температурах дымовых газов с 400 и 1000 °C соответственно. По мере дальнейшего нагрева эта разница снижается и достигает значений 25,12 и 3,40 °C в центре пластины через 1 ч после начала нагрева при тех же температурах дымовых газов.
2. Разница средних температур шихты, определенных при  $\varepsilon_{ст}=0,98$  и  $\varepsilon_{ст}=0,80$  в момент времени 3600 с после начала нагрева составляет 5,14 и 0,34 °C при нагреве дымовыми газами с температурами 400 и 1000 °C, соответственно. Этот факт свидетельствует о незначительном влиянии величины степени черноты стекла в интервале 0,80...0,98 на процесс нагрева шихты при больших временах.
3. При расчетах процессов нагрева стекольной шихты необходимо учитывать радиационную составляющую подвода тепла, так как предложенная в [3] модель нагрева с учетом только конвективного подвода тепла дает заниженные значения температурных полей в шихте, а также завышенные значения времени ее прогрева. Полученные результаты согласуются с определениями, представленными в [9], согласно которым в печах или в зонах высоких температур туннельных печей основным видом теплоотдачи газов к материалу является излучение. Кон-



**Рис. 3.** Температурное поле в шихте при нагреве дымовыми газами с температурой 400 °С через 100 (а) и 3600 (б) с после начала нагрева при  $\epsilon_{\text{ст}}$ : 1) 0,40; 2) 0,80; 3) 0,90; 4) 0,94; 5) 0,98



**Рис. 4.** Температурное поле в шихте при нагреве дымовыми газами с температурой 1000 °С через 100 (а) и 3600 (б) с после начала нагрева при  $\epsilon_{\text{ст}}$ : 1) 0,40; 2) 0,80; 3) 0,90; 4) 0,94; 5) 0,98

вективный теплообмен преобладает над радиационным при пониженных температурах газов

и при относительно высоких скоростях движения (3...5 м/с).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла. – Минск: Наука и техника, 1972. – 304 с.
2. Демидович Б.К. Пеностекло. – Минск: Наука и техника, 1975. – 247 с.
3. Китайгородский И.И., Кешишян Т.Н. Пеностекло. – М.: Промстройиздат, 1953. – 78 с.
4. Шилл Ф. Пеностекло (производство и применение). Перев. с чеш. – М.: Стройиздат, 1965. – 307 с.
5. Китайцев В.А. Технология теплоизоляционных материалов. – 3-е, перераб. и доп. изд. – М.: Стройиздат, 1970. – 384 с.
6. Горайнов К.Э., Дубенецкий К.Н., Васильков С.Г., Попов Л.Н. Технология минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1976. – 536 с.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
8. Шак А. Промышленная теплопередача. Перев. с нем. Е.М. Степанова. – М.: Гос. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. – 524 с.
9. Левченко П.Л. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. – М.: Альянс, 2007. – 367 с.
10. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
11. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 492 с.
12. Лотов В.А., Кривенкова Е.В. Кинетика процесса формирования пористой структуры пеностекла // Стекло и керамика. – 2002. – № 3. – С. 14–17.
13. Булавин И.А., Макаров И.А., Рапопорт А.Я., Хохлов В.К. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов. – М.: Стройиздат, 1982. – 249 с.

Поступила 16.09.2008 г.